

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Лекция 3.

Фотоны. Масса и импульс фотона

Согласно квантовым гипотезам Планка и Эйнштейна свет испускается, распространяется и поглощается дискретными порциями – квантами. Фотоэлектрический процесс выглядит так, как если бы световая энергия переносилась отдельными частицами, причем каждая такая частица, попадая в атом, передает ему свою энергию полностью, что несовместимо с понятием волны. Свет представляет собой поток отдельных частиц – *фотонов*.

До сих пор при объяснении квантовых оптических явлений использовалась одна характеристика фотона – его энергия: $\varepsilon = h\nu$.

Помимо энергии фотон обладает массой и импульсом. Массу фотона можно найти из формулы, выражающей связь массы и энергии в теории относительности:

$$E = mc^2, \quad \varepsilon_{\text{ф}} = h\nu, \quad h\nu = mc^2,$$

откуда

$$m_{\text{ф}} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (1)$$

Масса фотона существенно отличается от массы макроскопических тел и других элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов и др.). Это отличие состоит в том, что фотон не обладает массой покоя m_0 . Если считать, что фотон обладает массой покоя и движется со скоростью c , применение формулы, выражающей зависимость массы от скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

приводит к абсурду ($m = \infty$). Таким образом, покоящихся фотонов не существует.

Импульс фотона (в соответствии с (1) и формулой $v = c/\lambda$)

$$p_{\text{ф}} = m_{\text{ф}}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Итак, все три корпускулярные характеристики фотона (как частицы) $m_{\text{ф}}$, $\varepsilon_{\text{ф}}$ и $p_{\text{ф}}$ связаны с волновой характеристикой света – его частотой ν (или длиной волны λ).

Давление света

Одним из экспериментальных подтверждений наличия у фотонов массы и импульса является существование светового давления. Мысль о том, что свет при встрече с телами должен оказывать на них давление, была высказана ещё немецким астрономом И.Кеплером в XVII веке.

С точки зрения теории фотонов давление света на поверхность происходит в результате передачи импульса при поглощении и отражении света поверхностью.

Рассчитаем давление, оказываемое на плоскую поверхность падающим нормально монохроматическим световым потоком с частотой ν . Пусть в единицу времени на единицу площади тела падает N фотонов. При коэффициенте отражения ρ (коэффициент отражения равен отношению энергии отраженной к энергии падающей) света от поверхности тела ρN фотонов отразится, а $(1-\rho)N$ – поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс $p_{\phi} = h\nu/c$, а каждый отраженный передает импульс $p_{\phi} - (-p_{\phi}) = 2h\nu/c$.

Используя второй закон Ньютона и формулу давления, можно получить формулу для давления света. Давление света p на поверхность равно импульсу, который передают единице поверхности N фотонов в 1 секунду:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{v}) ; \quad p = F/S ;$$

$$p = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t \cdot S} = 2 \frac{h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho)N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N ,$$

где $h\nu N = E_{\phi}$ – энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени.

В итоге давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность:

$$p = \frac{E_{\phi}}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho), \quad (3)$$

где $w = E_{\phi}/c$ – объемная плотность энергии излучения.

Световое давление ничтожно мало. Так, прямые солнечные лучи в яркий день оказывают при полном поглощении давление $4 \cdot 10^{-7}$ Н/м². Благодаря столь малой величине, заметить световое давление трудно.

Впервые экспериментально световое давление на твердые тела было обнаружено и измерено русским физиком П.Н. Лебедевым в 1901 году. В 1908 году Лебедев решил ещё более трудную задачу – экспериментально обнаружил и

измерил световое давление на газы. Эта работа подтвердила правильность гипотезы русского астронома Ф.А. Бредихина об образовании кометных хвостов: тот факт, что кометные хвосты всегда отклонены от Солнца, объясняется световым давлением.

Несмотря на малое значение светового давления, с ним приходится считаться. Так, неравномерное освещение искусственных спутников Земли приводит в некоторых случаях к возникновению нежелательных вращающих моментов, что приходится учитывать при расчете условий полета космических аппаратов. Световое давление играет большую роль в эволюции горячих звезд, так как препятствует сжатию звезды под действием гравитационных сил.

Эффект Комптона

Рассмотренный выше фотоэлектрический эффект показывает, что взаимодействие света с веществом происходит путем передачи энергии фотона. Наличие светового давления свидетельствует о передаче импульса фотона. Однако наиболее полно и ярко корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона.

В 1923 году американский физик А. Комптон, исследуя рассеяние монохроматических рентгеновских лучей веществами с легкими атомами (парафином, бором и др.), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также излучение более длинных волн.

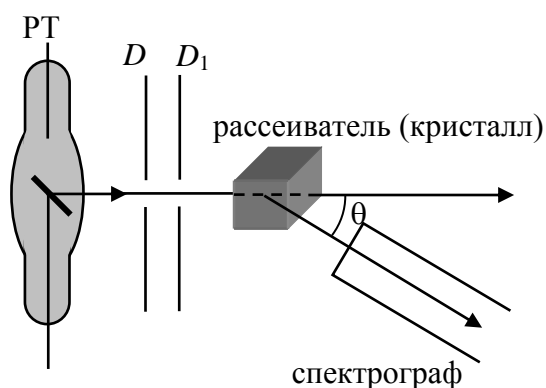


Рис. 1.
Схема опыта Комптона

Схема опыта Комптона представлена на рис. 8. Монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны λ , испускаемое рентгеновской трубкой (РТ), проходит через диафрагмы D и D_1 и в виде узкого пучка падает на рассеиватель. Рассеянные лучи анализируются с помощью спектрографа рентгеновских лучей.

Попытки объяснить эффект Комптона с волновой точки зрения оказались безуспешными. Тогда для его объяснения была использована квантовая теория (взаимодействием световых фотонов с электронами вещества). Совпадение теоретических результатов с опытными данными подтвердило правильность квантовой теории.

Если при объяснении фотоэффекта достаточно было закона сохранения энергии, а при объяснении механизма светового давления закона сохранения

импульса, то эффект Комптона для своего объяснения требует применения двух законов сохранения (энергии и импульса).

Изложим кратко квантовую теорию явления Комптона. Будем рассматривать взаимодействие рентгеновского излучения с веществом как процесс столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами по законам упругого столкновения. Используем законы сохранения энергии и импульса.

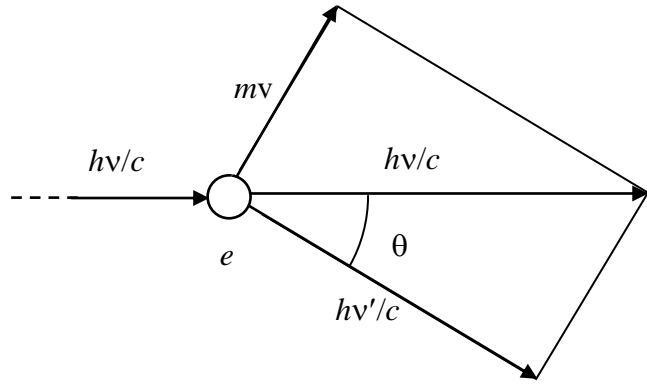


Рис.2. Расчетная схема

Пусть на покоящийся электрон с массой m_0 и энергией покоя m_0c^2 падает рентгеновский фотон с энергией $h\nu$ (рис.2). В результате упругого столкновения электрон приобретает импульс, равный mv , и его полная энергия становится равной mc^2 . Фотон, столкнувшись с электроном, передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается) на угол θ .

Уменьшение энергии фотона означает уменьшение частоты (увеличение длины волны) рассеянного излучения.

Пусть импульс и энергия рассеянного фотона равны соответственно $h\nu'/c$ и $h\nu'$.

В соответствии с законом сохранения энергии суммарная энергия фотона и электрона до удара и после удара остается неизменной:

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2. \quad (4)$$

Энергия электрона находится в обозначениях рис. 9 по теореме косинусов

$$(mv)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu'\cos\theta, \quad (5)$$

где v – скорость электрона.

Масса движущегося электрона m связана с его скоростью v соотношением:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2 / c^2)}} \quad (6)$$

После преобразований получим:

$$\nu - \nu' = \frac{h}{m_0 c^2} \nu \nu' (1 - \cos\theta).$$

Переходя от частоты к длине волны $\nu = \frac{c}{\lambda}$, $\nu' = \frac{c}{\lambda'}$, имеем:

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (7)$$

Выражение (7) является формулой Комптона, полученной им экспериментально. Подстановка значений h , m_0 и c дает величину

$$\lambda_e = h/(m_0 c) = 2,426 \text{ пм},$$

называемую комptonовской длиной волны электрона.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например, протонах. Однако ввиду большой массы протона его отдача ощущается лишь при рассеянии фотонов очень больших энергий.

Если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов, то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом, и в этом случае длина волны λ' рассеянного излучения не будет отличаться от длины волны λ падающего излучения.